

平成30年 4月18日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13699

研究課題名(和文)自己補対メタ表面のサーマルイメージングへの応用

研究課題名(英文)Application of self-complementary metasurface for thermal imaging

研究代表者

北野 正雄 (Kitano, Masao)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70115830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電磁波分布をメタ表面と呼ばれる人工2次元構造上の吸収熱の観測により可視化する方法(サーマルイメージング)を開発した。チェッカーボード型メタ表面に自己補対性という対称性に関する条件を課すことで、広い帯域で高効率なサーマルイメージングが実現できる。電磁界・熱混成計算によってメタ表面における電磁波による発熱と熱の拡散を計算した結果、一様抵抗膜と比べて大きな温度上昇を格子点における抵抗膜で観測した。実験において、マイクロ波を入射したメタ表面をサーモグラフィーで観測した結果、抵抗膜での局所的な温度上昇を観測することに成功し、高効率かつ広帯域なイメージングが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research develops thermal imaging which visualizes the distribution of electromagnetic waves by observing temperature rise induced by absorption on a two-dimensional artificial structure, called metasurface. By imposing symmetry condition called self-complementarity on a checkerboard-like metasurface, efficient thermal imaging can be expected in broad spectral regions. The simulations, which compute heat induced by electromagnetic waves and its thermal diffusion, showed higher temperature rise in resistive sheets at the corners of the checkerboard structure compared with an uniform resistive sheet. In our experiment, which observed fabricated metasurfaces illuminated by microwave using a thermography, we observed significant temperature rise localized at the resistive sheets, and shown that the devise can be employed for effective and broadband thermal imaging.

研究分野：電磁波工学

キーワード：メタマテリアル 自己補対構造 サーマルイメージング テラヘルツ波 マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波やテラヘルツ波などの電磁波は通常の方法では撮影することができないので、可視化する技術が必要となる。電磁波を吸収する物質に入射することで発生する熱をサーモグラフィで撮影することで、電磁波分布を可視化する方法(サーマルイメージング)が考えられるが効率などの問題がある。実際、テラヘルツ波の可視化にこの方法が利用されることがあるが、一般に弱い出力のテラヘルツ波を可視化するには発熱による温度上昇が十分ではない。

そこで、より効率的なサーマルイメージングに、我々が以前より研究してきた自己補対メタ表面が利用できることに着目した。メタ表面とは、波長より小さい基本構造からなる2次元の人工構造体で電磁波の制御技術として近年盛んに研究されている。自己補対メタ表面とは、金属膜、抵抗膜、空隙からなる2次元構造において、インピーダンス反転という操作を行っても構造が変わらない対称性をもつもので、透過率、反射率、(散乱を含む)吸収率が周波数によらず一定(周波数無依存)になるという性質がある。我々は、この周波数無依存性をテラヘルツ時間領域分光法を用いて実証している。

2. 研究の目的

本研究は自己補対メタ表面を利用した電磁波のサーマルイメージングを目的とする。特に、図1に示すようなチェッカーボード型自己補対メタ表面を利用する。この構造は、金属と空隙からなるチェッカーボード構造の交点に抵抗膜を配置した2次元構造であり、抵抗膜の抵抗率を特定の値にすることで自己補対性を有する。この自己補対性があるときに、電磁波の吸収率は最大になり、周波数にも依存しないという特徴をもつ。抵抗膜の面積を小さくしてもこの自己補対性は成立し、熱の集中による温度上昇を期待することができる。図1のように電磁波が照射された部分のみ抵抗部の発熱が生じ、これをサーモグラフィで観測することで効率良く電磁波の可視化を行うということが本研究の主要な目的である。

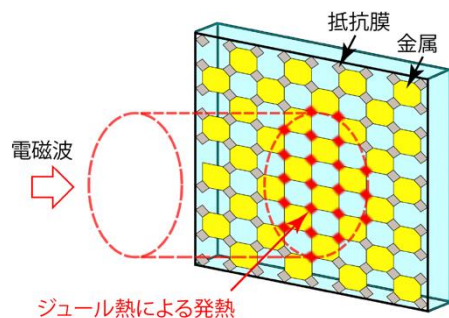


図1 チェッカーボード型自己補対メタ表面上の発熱を利用した電磁波の可視化(サーマルイメージング)の概念図

3. 研究の方法

本研究ではまず、シミュレーションによって電磁波を入射したときの自己補対メタ表面上の発熱を計算し、本研究の有用性を検証する。また、実験のためのメタ表面の設計も行う。シミュレーションでは、電磁波をメタ表面に照射したときのジュール熱の計算と発熱の基板及び空気への拡散を計算する必要がある。この、電磁波と熱の混成計算には有限要素法をベースとする、COMSOL Multiphysics を利用する。

実験検証は、高出力の信号源を用意することができるマイクロ波帯を中心に行うが、抵抗膜の抵抗率の測定はテラヘルツ帯で行うなど場合によって周波数帯や測定手法を選んで研究を進める。サンプルの作成は比較的熱伝導率の低い合成石英を基板として用い、レーザ描画によって金属(アルミニウム)と抵抗膜(チタン)のパターンを作成する。実験では、導波管の出口に作成したチェッカーボード型自己補対メタ表面を設置し、導波管に電磁波を送信した際のメタ表面の発熱をサーモグラフィで観測する。

4. 研究成果

(1) 自己補対型メタ表面を用いた電磁波のサーマルイメージング

本研究は、図1に示すようなチェッカーボード型メタ表面に電磁波を入射することで発生する発熱をサーモグラフィで観測することで電磁波分布を高効率に可視化するというものがある。研究は、計算機シミュレーションによる設計と本手法の有効性の検証、そしてサンプル作成と実験検証に分けられる。

a) 電磁界・熱混成計算による検証

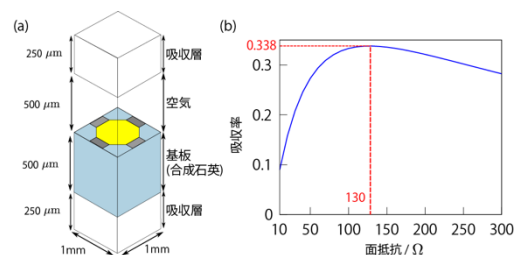


図2 (a) シミュレーション空間 (b) 抵抗膜の面抵抗とメタ表面での吸収率の関係

計算したメタ表面の設計パラメータと境界条件を図2(a)に示した。側面に周期境界条件を課すことにより、実効的に図の構造が無限に並んだ周期構造に対する電磁波の吸収及び熱の拡散を計算することができる。基板は合成石英を仮定し、基板上部の空気への熱の拡散と基板への熱の拡散を計算している。

まず、抵抗膜の面抵抗を最適化するために電磁波の吸収率を計算した。基板がある場合には厳密には自己補対条件は成立しないが、吸収率を最大にする面抵抗を選ぶことで近似的

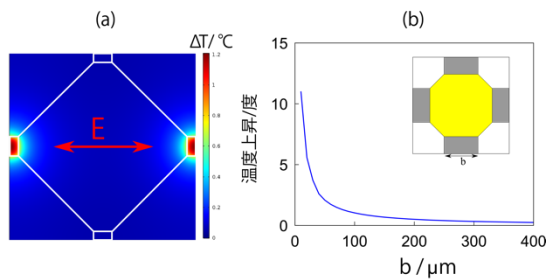


図 3 (a) 電磁波入射時の温度上昇分布 (b) 抵抗膜の一边の長さや温度上昇の関係

に本研究に必要な周波数無依存応答を実現することができる. 図 2(b)に抵抗膜の面抵抗を変化させたときの電磁波の吸収率の計算結果を示す. 図に示したように, 面抵抗を $130\ \Omega$ にしたときに吸収率が最大になることが分かった. 今後のシミュレーションでも, 実験におけるサンプル作成においてもこの面抵抗値を用いる.

単位構造の温度上昇分布を計算した例を図 3(a)に示した. 入射した電磁波の電界 E の向きを矢印で示している. 抵抗膜で局所的な温度上昇がおこっていることが分かる. また, 温度上昇がおこる部分は偏光に依存する. 図 3(a)は横偏光に対して計算した例であり温度上昇は左右の抵抗部で生じているが, 縦偏光に関して計算すると上下の抵抗部で温度上昇が生じる. このように, 偏光に関する情報も得られることが一様な抵抗膜に対する本手法の大きな利点の一つといえる.

構造がない一様な抵抗膜においても同じだけ吸収率があるが, チェッカーボード型自己補対メタ表面を用いることで同じ吸収量を小さい抵抗膜で実現でき, 温度上昇がより大きくなる. このことを確認するために, 抵抗膜の一边の長さを変えながら同様の計算をし, 抵抗膜での温度上昇を求めた. 図 3(b)にその結果を示した. 結果より明らかなように, 抵抗膜を小さくするほど温度上昇が増えることがわかる. また, 計算結果の解析により, 温度上昇は抵抗膜の一边の長さに反比例することも分かった.

以上のように, チェッカーボード型自己補対メタ表面を用いることで, 単純な一様抵抗膜のときと比べて, 発熱が集中しより高効率に電磁波分布を可視化できる上に, 偏光に関する情報も得ることができると分かった.

b) サーマルイメージングの実験検証

チェッカーボード型自己補対メタ表面は上記の計算結果を参考にして設計を行った. まず, 最適化された抵抗膜の面抵抗 $130\ \Omega$ を実現するために, 合成石英基板上に様々な膜厚のチタン薄膜を成膜し面抵抗の測定を行った. これには, テラヘルツ時間領域分光法を利用し, 透過率から面抵抗を算出した. これにより, 22nm の膜厚のチタン薄膜に必要な面抵抗 $130\ \Omega$ を実現できることが分かった.

以上の設計に基づきチェッカーボード型メ

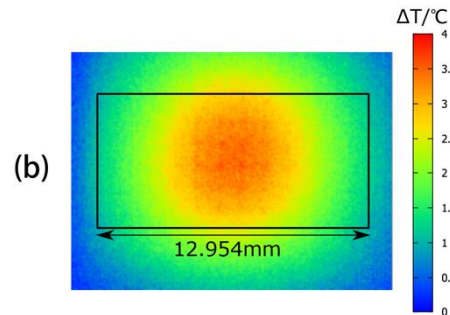
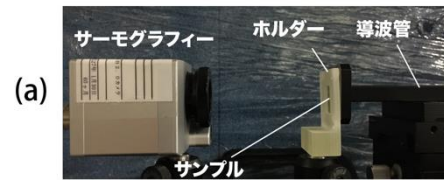


図 4 (a) 実験系の外観 (b) サーマルイメージングの一例

タ表面を合成石英基板上に作成した. レーザ描画とリフトオフにより, アルミニウムによる金属パターンとチタンによる抵抗膜パターンを作成した. ただし, 実験は高出力 (200mW) が得られるマイクロ波帯 (15GHz) で実験を行った. 実験の外観図を図 4(a)に示す. マイクロ波は導波管を通り開口に設置されたサンプル (メタ表面) によって吸収される. その吸収による発熱を対向して設置されたサーモグラフィで観測している.

抵抗膜の一边が $15\ \mu\text{m}$ のときの実験結果を図 4(b)に示す. 黒線が導波管の開口を示している. 期待された結果より広めに熱が拡散しているが, 局所的に温度が上昇していることが確認できる. 一様抵抗膜の場合と比べると 1.5 倍程度の温度上昇が観測され本手法の有用性を検証することができた.

c) 低熱伝導薄膜上へのメタ表面作成の検討

以上のように実験においても本手法の有用性を確認することができたが, 計算機シミュレーションの結果に比べて熱の拡散が大きく, 温度上昇が期待される値より少なかった. これは, 実験条件とシミュレーション条件の間

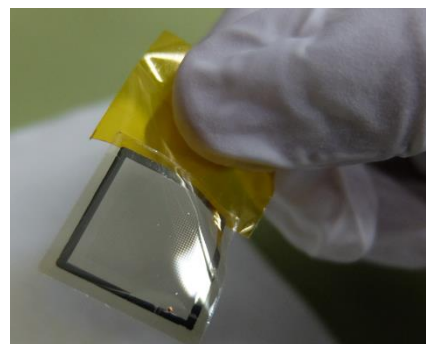


図 5 ポリイミド薄膜上のメタ表面

にずれがあったからである。熱の拡散をさらに抑えるためには、熱伝導性が低くかつ薄い基板を利用することが考えられる。この実現に向けて、ポリイミド薄膜上へのメタ表面の作成に取り組んだ。合成石英基板上にスピントでポリイミド薄膜を成膜した後、上面にメタ表面を作り、最後に基板からメタ表面付きポリイミド薄膜を剥離することで作成することができる。図 5 に試作したメタ表面の写真を示す。(写真はスプリットリング共振器と呼ばれる構造を基本とするメタ表面であり自己補対構造ではない。)ポリイミドの膜厚は $8\mu\text{m}$ 程度と非常に薄いため、基板による多重反射の影響もなく、理想的な自己補対構造の実現が期待できる。また、計算機シミュレーションにおいてはサーマルイメージングの効率が合成石英基板のときに比べて上昇することが分かっている。

(2) 自己補対メタ表面におけるコヒーレント完全吸収

コヒーレント完全吸収とは、平面構造の両面より同位相の電磁波を入射することで、電磁波が平面構造に全て吸収されるという現象である。(逆位相で入射した場合は吸収が消失する。)片側の電磁波の入射の有無あるいは位相によって、もう片側の電磁波の吸収率(もしくは透過率)を制御することが可能であり、非線形光学応答を必要としない光スイッチを実現するものとして注目を集めている。

このコヒーレント完全吸収は、波動インピーダンス Z の媒質中では面抵抗が $Z/2$ の一様抵抗膜でおこることが知られている。これに対して、自己補対構造においてもコヒーレント完全吸収が実現できることに注目した。特に、サーマルイメージングの研究でも利用するチェッカーボード型自己補対メタ表面を利用することとした。このとき抵抗膜の面抵抗が $Z/2$ のときに自己補対条件が成立する。

まず、電磁界シミュレーションによって、両面から同強度の電磁波が入射した場合の吸収率を、テラヘルツ帯の実験を想定した設計パラメータを用いて計算した。両電磁波の相対位相 ϕ 毎に計算を行った結果が図 6 である。

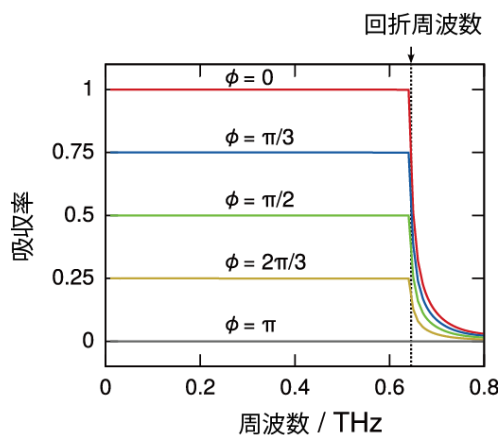


図 6 自己補対メタ表面の吸収率の計算結果

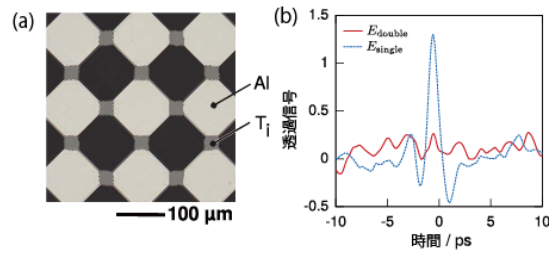


図 7 (a) 作成したメタ表面 (b) 透過信号

位相差がない $\phi=0$ の場合に回折周波数以下で吸収率が 1、つまり完全吸収を実現できていることが分かる。また、逆位相 $\phi=\pi$ のときには、吸収が完全に消失していることが分かる。これらは、コヒーレント完全吸収の特性である。また、コヒーレント完全吸収の他の研究では特定の周波数のみでこの性質が実現されている場合が多いが、チェッカーボード型自己補対メタ表面では回折周波数以下の広い帯域でコヒーレント完全吸収が実現されていることが分かる。これは、自己補対構造特有の周波数無依存応答に起因するもので、本研究に特有の性質といえる。

実験のために、図 7(a) のようなテラヘルツ領域で動作するチェッカーボード型自己補対メタ表面を作成した。基板にはサファイア基板を用い、金属構造はアルミニウム、抵抗膜はチタンを利用した。測定はテラヘルツ時間領域分光法を利用し、メタ表面に 1ps 程度のテラヘルツパルスを入射したときの透過信号を測定した。実験結果は図 7(b) のようになった。点線が片側からのみテラヘルツパルスを入射したときの透過信号で、ほぼ入射信号と同じ波形の信号がメタ表面の吸収によって減衰して出力されている。実線は両側から同じタイミングで同振幅のテラヘルツパルスを入射したときの透過信号でパルスが完全に吸収されていることが分かる。時間領域でパルスが完全に吸収されたことは、周波数領域では広い帯域でコヒーレント完全吸収が実現されていることを意味し、実験においても自己補対構造特有の広帯域コヒーレント完全吸収を確認することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- [1] Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Theoretical study on dynamical planar-chirality switching in checkerboard-like metasurfaces," EPJ Appl. Metamaterials 4, 2 (2017). 査読有. DOI: 10.1051/epjam/2016016
- [2] Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, "A broadband and energy-concentrating terahertz coherent perfect absorber based on a self-complementary," Opt. Lett. 41, 4472–4475 (2016). 査読有. DOI: 10.1364/OL.41.004472

[3] Y. Nakata, Y. Urade, K. Okimura, T. Nakanishi, F. Miyamaru, M. W. Takeda, and M. Kitano, "Anisotropic Babinet-Invertible Metasurfaces to Realize Transmission-Reflection Switching for Orthogonal Polarizations of Light," Phys. Rev. Appl. 6, 44022 (2016). 査読有. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.044022

〔学会発表〕(計 8 件)

[1] 太田裕士, 中西俊博, 北野正雄, 「3 光波混合を用いた非線形誘電体メタマテリアルにおける電磁誘起透明化現象」日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 (2018).

[2] 浦出芳郎, 中田陽介, 中西俊博, 北野正雄, 「二次元的カイラリティをもったチェッカーボード状メタ表面における非対称透過」日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017).

[3] 中西俊博, 北野正雄, 「動的変調メタマテリアルを用いた電磁波の保存と再生」輻射科学研究会, 滋賀県立大学 (2017).

[4] 中西俊博, 「量子系と結合共振器系のアナロジー」NAIST 異分野融合ワークショップ, 奈良先端大学院大学 (2017).

[5] K. Hieda, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Slow Propagation of Spoof Surface Plasmon Polariton Excited on Metallic Lieb Lattice," Progress In Electromagnetics Research Symposium, Singapore (2017).

[6] T. Nakanishi, S. Tohi, and M. Kitano, "Control of electromagnetically-induced-transparency-like effect in metamaterials for coherent storage of electromagnetic waves," 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Korea (2017).

[7] Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Dynamic Handedness Switching in Planar Chiral Checkerboard Metasurfaces: Theory and Numerical Simulation," 10th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. Opt, Greece (2016).

[8] T. Nakanishi and M. Kitano, "Demonstration of true electromagnetically induced transparency in a metamaterial," 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Spain (2016).

〔その他〕

ホームページ

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.php?id=25>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 正雄 (KITANO, Masao)
京都大学・大学院工学研究科
研究者番号 : 70115830

(2) 研究分担者

中西 俊博 (NAKANISHI, Toshihiro)
京都大学・大学院工学研究科
研究者番号 : 30362461

(3) 研究協力者

中田 陽介 (NAKATA, Yosuke)
浦出 芳郎 (URADE, Yoshiro)